

# Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Elektrik Motorlarında Vuruntu Moment Minimasyonu

Metin Aydın

Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli  
e-posta: metin.aydin@kou.edu.tr

## Özetçe:

Radyel akılı sürekli mıknatıslı (RASM) standart motorlarda vuruntu momentin azaltılması için bir çok yöntem mevcuttur ve bunların çoğu eksenel akılı sürekli mıknatıslı (EASM) disk motorlara da uygulanabilir. Ancak, EASM motorların statorunun üretiminin zorluğu ve maliyetlerinin yüksek olması vuruntu momentini azaltmak için, RASM motorlarda kullanılan tekniklerden farklı alternatif tekniklere ihtiyaç oluşturur. Bu çalışmada EASM motorlar için vuruntu moment minimizasyon teknikleri üzerinde durulmuş, bir kaç yeni alternatif teknik önerilmiştir. Bu tekniklerin etkileri 3 boyutlu sonlu elemanlar (3D SE) yöntemi kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçlar bir EASM referans motor ile karşılaştırılmıştır.

## 1. Giriş

Elektrik motorlarında moment dalgalanmalarının [1-3] bir çok kaynağı mevcuttur. Bunlar arasında a) vuruntu momenti, b) PWM akım harmonikleri, c) ideal olmayan zıt EMK dalga şekli, d) faz komütasyonu ve e) DC baradaki dalgalanmalar ilk sıralarda yer alır. Yüksek hızlarda moment dalgalanmaları sistemin eylemsizliği sayesinde süzülebilir. Ancak, düşük hızlarda moment dalgalanmaları kabul edilemez boyutlarda hız değişimlerine, titreşime ve akustik gürültüye neden olur.

Vuruntu momenti sürekli mıknatıslı (SM) motor tasarımında önemli bir unsur olduğu için, bu çalışmada sadece vuruntu momentinin minimizasyonuna odaklanılmıştır. Vuruntu momenti sürekli mıknatıslardan kaynaklanan EMF harmonikleri ile statordaki oluklardan kaynaklanan manyetik iletkenlik harmoniklerinin etkileşiminden ortaya çıkar ve bir önlem alınmazsa motor miline ciddi boyutlarda yansiyabilir. RASM motorlarda vuruntu momentini azaltmak için stator oluklarına ya da mıknatıslara eğim verilmesi (kayık), mıknatıslara özel şekiller verilmesi ve kaydırılması, yardımcı olukların ya da dişlerin kullanılması, mıknatıs kutbunun optimizasyonu, kesirli sargıların kullanılması gibi birçok teknik uygulanmıştır [4-22]. Bu tekniklerin bazıları direkt olarak EASM motorlara uygulanabilir [23-29]. Fakat, bu tekniklerin EASM motorlara maliyet yönünden etkisi büyük olabilir. Bu nedenle düşük maliyet gerektiren, EASM motorlara uygun vuruntu momentini azaltacak teknikler tercih edilmelidir. Bu çalışmada da EASM motorlarda bu amaca uygun vuruntu momentinin minimizasyon teknikleri incelenmiş, yeni teknikler önerilmiş ve 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi (3D SEA) kullanılarak bu tekniklerin etkinliği araştırılmıştır.

## 2. Vuruntu Momentinin Hesaplanması

Vuruntu momenti ister analitik ister sonlu elemanlar yöntemi ile belirlensin, Fourier serisi ile tanımlanabilir [8]:

$$T_{cog}(\theta_m) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k \sin(kN_c\theta_m + \phi_k) \quad (1)$$

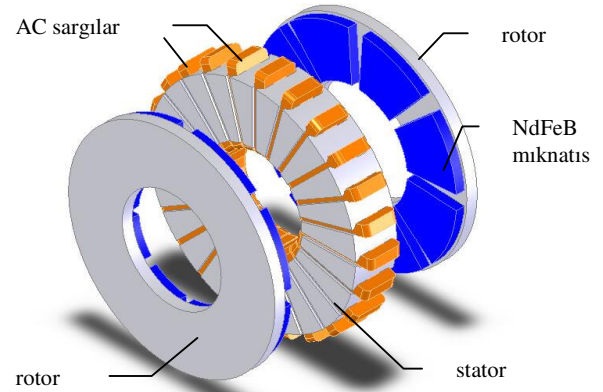
Burada  $\theta_m$  rotorun pozisyonu,  $T_k$   $k$  inci harmoniğin genliği ve  $\phi_k$   $k$  inci harmoniğin faz acısı,  $N_c$  rotor kutup sayısı ile stator oluk sayısının ( $N_s$ ) en küçük ortak katını göstermektedir. Eğer kutup başına düşen oluk sayısı bir tamsayı ise  $N_c=N_s$  olur.

Vuruntu momenti Maxwell Gerilme Tensörü ya da Sanal İş Tekniği metotları kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilir [30-34]. Maxwell gerilme tensörü yönteminin avantajı, vuruntu momenti hesabının tek bir alan hesabı gerektirmesidir. Ancak, hassasiyet eleman yoğunluğuna ve integralin derecesine bağlıdır. Sanal İş Tekniğinin ise uygulaması daha kolaydır. Ancak, iki farklı rotor konumu için alan hesabı gerektirir ve nümerik hatadan dolayı hassasiyetten taviz vermek gerekebilir.

Bu çalışmada, 3D SEA ile farklı metotlar kullanılarak vuruntu momenti hesabı yapılmıştır. Ancak, 3 boyutlu SEA, 2 boyutlu SEA ya göre çok zaman alacağı için SEA analitik teknikler yardımı ile gerçekleştirilir ve simülasyonlarda harcanan zaman en aza indirilir. Bu çalışmada, maliyet nedeniyle stator tarafında yapılabilecek değişikliklerden çok makinenin rotor yapısına uygulanabilecek değişiklikler ile ilgili minimizasyon metotlarına odaklanılmıştır. Burada kullanılan metotlardan bazıları radyel akılı sürekli mıknatıslı motorlara uygulanabileceği gibi bazı teknikler sadece EASM motorlara özgüdür ve sadece bunlara uygulanabilir.

## 3. Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Motor – Referans Motor – SE Analizi

Bu çalışmada yapılan analizlerde Şekil 1 de gösterilen 24-oluklu, 8-kutuplu 2-rotor-1-statorlu eksenel akılı sürekli



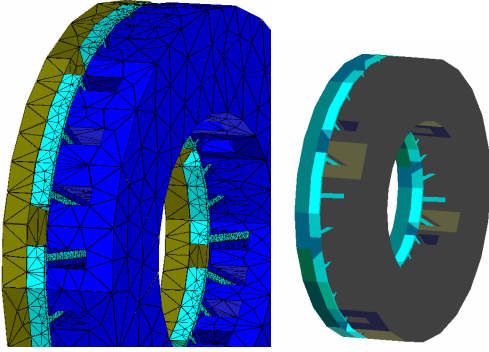
Şekil 1: 8-kutuplu, 24-oluklu eksenel akılı sabit mıknatıslı motor

mıknatıslı motor referans motor olarak kullanılmıştır. Bu tip bir EASM motorun statoru spiral bir tarzda sarılmış silisli lamineli bir stator, rotoru ise bir disk ve yüzeye yerleştirilmiş fan tipi mıknatıslardan oluşur. Ayrıca statorda Gramme tip 3 fazlı sargılar karşılıklı oluklara yerleştirmiştir. Temel akı yönü şu şekildedir: Akı her iki rotorun kuzey kutbundan önce statora, statorun dairesele olarak bir kutup boyunca ilerleyip tekrar hava aralıklarını geçerek rotor disklerin güney kutbuna geçip rotor diski üzerinden devresini tamamlar. Çalışmada kullanılan motorun parametreleri Tablo 1 de verilmiştir.

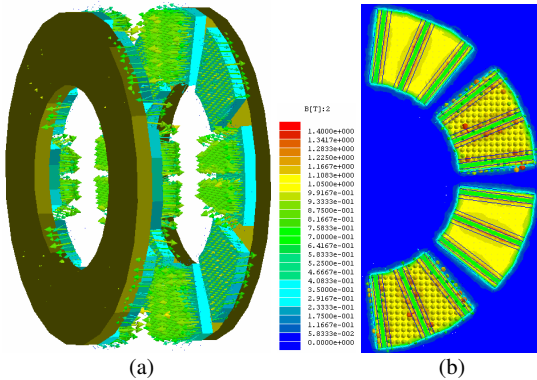
Tablo 1: EASM Motorun Temel Parametreleri

Stator dış çapı	89mm	Kutup sayısı	8
Stator iç çapı	50mm	Hava aralığı	0.8mm
Mıknatıs kalınlığı	7.2mm	Faz sayısı	3
Stator eksele kalınlığı	22mm	Oluk sayısı	24
Mıknatıs oranı	0.756	Oluk / kutup / faz	1

Bu motor boyutlandırıldıktan sonra SEA yapılarak motor performansı kontrol edilmiş, ancak vuruuntu momentini azaltmak için hiç bir yonteme başvurulmamıştır. Böylece çalışmada kullanılan vuruuntu momenti minimizasyon tekniklerinin referans disk motor ile karşılaştırılmasına fırsat verilmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3'de yapılan analizlerden birinde kullanılan 3 boyutlu eleman yapısı, motor modellerinden biri ve yüksüz durum hava aralığı akı yoğunluğu gösterilmektedir.

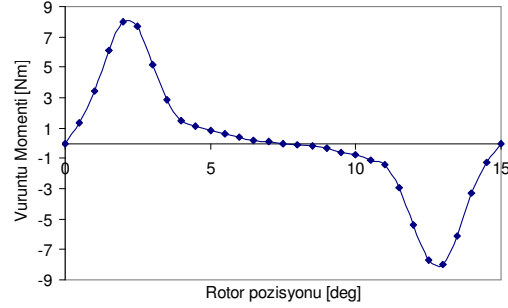


Şekil 2: EASM referans motor SEA modeli ve 3D eleman yapısı (Toplam eleman sayısı: 127483 tetrahedra, toplam CPU zamanı 29 dakika, kullanılan bilgisayar P4-1.8MHz)



Şekil 3: EASM referans motorun mıknatıs akısının yönü (a) ve yüksüz durum hava aralığı akı yoğunluğu (b)

Olukların hava aralığı akı yoğunluğuna etkisi, vuruuntu momentinin maksimum ve minimum bölgeleri ve periodu Şekil 3'den açıkça görülmektedir. Bu motorun vuruuntu moment analizi de bir oluk adımı için 3D SEA kullanılarak yapılmış ve Şekil 4 de gösterilmiştir. Motor, tepe değeri 8 Nm olan bir vuruuntu momentine sahiptir.



Şekil 4: 2-Rotor-1-stator'lu eksele akılı sabit mıknatıslı referans motorun vuruuntu moment profili

#### 4. Sabit Mıknatıslı Disk Motorlarda Vuruuntu Momentinin Minimizasyon Yöntemleri

Daha önce kısaca bahsedildiği gibi vuruuntu momenti minimizasyon tekniklerinden daha önceki çalışmalarda sıkça bahsedilmiştir. Ancak, bu tekniklerin büyük bir çoğunluğu RASM motorların vuruuntu momenti minimizasyonunda kullanılmıştır. Bu nedenle bu çalışmada, EASM motorların vuruuntu momenti minimizasyonu tekniklerinin üzerinden geçilmiş ve EASM motorlara özgü yeni teknikler önerilerek 3D SEA simülasyonları ile çalışma desteklenmiştir.

##### 4.1. Stator Tarafından Uygulanabilecek Teknikler

Uygun stator oluk sayısının kutup sayısına oranı EASM motorlarda RASM motorlarda olduğu gibi vuruuntu momentini azaltıcı bir etki yaratır. Sürekli mıknatıslı motorlarda sıkça kullanılan tekniklerden biridir [8].

Başka bir teknik, stator dişlerinde yardımcı oluklar açmaktır [8][16]. Bu sayede vuruuntu momentinin frekansı artırılarak tepe değeri azaltılmış olur. Ancak EASM motorların karmaşık stator yapısını daha da karmaşık ve pahalı hale getireceğinden tercih edilmeyen bir metottür.

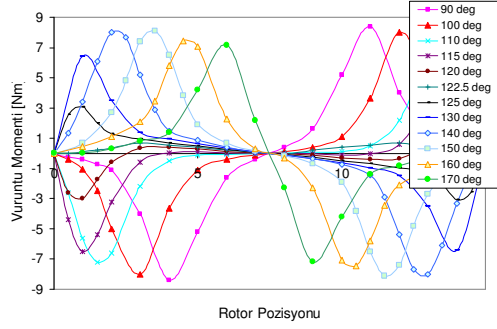
Oluk açıklığı ve karşılıklı oluklarda kaydırılmış oluk açıklığı ise EASM motorlarda vuruuntu momentini azaltan yöntemlerden bir kaçıdır [28-29]. Oluk açıklığının azaltılması, vuruuntu momentinin tepe değerinin azaltılması, karşılıklı oluklardaki oluk açıklıklarının birbirine göre kaydırılması ise her bir hava aralığındaki vuruuntu moment dalgalarının kaydırılarak toplam vuruuntuunun iptal edilmesi ilkesi ile açıklanabilir.

##### 4.2. Mıknatıs Adımının Mıknatıs Kutbuna Oranı

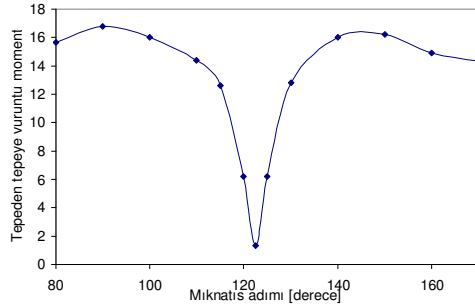
EASM motorlarda vuruuntu momentini azaltmanın en etkin ve yaygın kullanılan metodu mıknatıs adımının kutup adımına oranını uygun bir değerde seçmektir. Bilindiği gibi, vuruuntu momenti, mıknatıs kutuplarının kenarları ile stator olukları arasındaki etkileşimden oluşur. Bu nedenle, gerek vuruuntu momenti dalga şekli, gerekse tepe değeri mıknatıs adımına bağlıdır. Mıknatıs adımı azaltılarak mıknatıs kaçak akısı da

azaltılabilir, fakat mıknatıs akısı dolayısıyla ortalama moment de azalmış olur. Bu nedenle uygun seçilecek bir mıknatıs adımı vuruş momentini istenen seviyelere düşüreceği gibi ortalama momentte de ciddi bir düşüşe neden olmaz.

Farklı mıknatıs adımları için SEA tarafından elde edilen vuruş moment profili Şekil 5 te verilmiştir. Şekil 6 ise vuruş momentinin tepe değerinin mıknatıs adımına göre değişimini göstermektedir. Mıknatıs adımı elektriksel 140° ( $\alpha_p=0.778$ ) iken vuruş momentinin tepe değeri ana momentinin yaklaşık %51'i, 122.5° ( $\alpha_p=0.68$ ) iken ise yaklaşık %5'i olarak bulunmuştur.



Şekil 5: Farklı mıknatıs adımları için vuruş momentinin bir periyot daki değişimi



Şekil 6: Farklı mıknatıs adımları için vuruş momentinin tepe değerinin değişimi

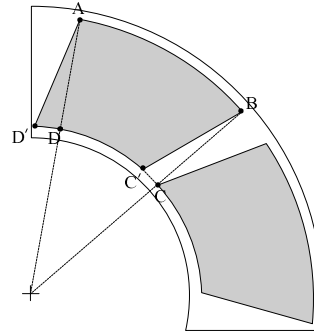
### 4.3. Klasik Kaykısı

Klasik kaykısı sürekli mıknatıslı motorlarda sıkça kullanılan basit ve çok etkili vuruş moment azaltma yöntemlerinden biridir. Sürekli mıknatıslı motorlarda kaykısı, stator olukları (stator saçları) ya da rotor mıknatısları olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilir. Standart radyel akılı sabit mıknatıslı motorlarda bu işlem stator oluklarına kaykısı verilmesi ile gerçekleştirilir çünkü rotor yüzeyindeki mıknatıslara kaykısı verilmesi güç ve masraflıdır. Oysa, EASM motorlarda RASM motorların tam tersi bir durum söz konusudur. Rotor mıknatıslarına kaykısı vermek düzlemsel mıknatıs yüzeyinden dolayı stator oluklarına göre çok daha basit ve ucuz bir yöntemdir. Bu nedenle rotor mıknatıslarının kaykısı EASM motorlarda sıkça kullanılmaktadır. Şekil 7 kaykısız (ABCD) ve kaykılı (ABC'D') bir EASM motorun rotorunu göstermektedir. Bu teknolojinin dezavantajları arasında ortalama momentte bir düşüşe neden olması, pahalı ve karmaşık mıknatıs yapısı ve kaçak enduktanstaki artış sayılabilir.

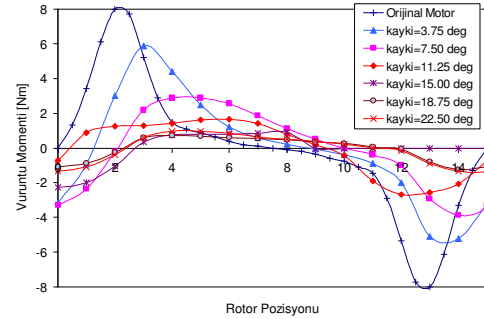
Vuruş momentini en aza indirmek için gerekli kaykısı açısı;

$$\theta_{skew} = \frac{2\pi}{N_c} \quad (3)$$

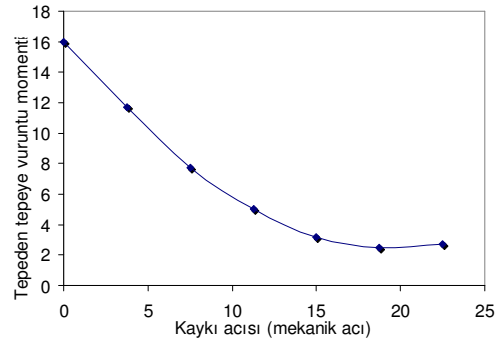
RASM motorlarda kaykısı açısı arttıkça vuruş momentini kademeli bir biçimde düşer [8]. Ancak, EASM motorlarda optimum kaykısı yukarıdaki denklemde verildiği gibi hesaplanmaz. Bunun temel nedeni ise rotor iç ve dış çaplarının yarattığı manyetik kaçak akıdır. Bu nedenle vuruş momentini EASM motorlarda sıfır olmaz. Ancak bu tip motorlarda vuruş momentini minimum yapan kaykısı açısı optimum açı olarak kabul edilir. Bu tip bir çalışma Şekil 8 ve Şekil 9 da gösterilmiştir. Kaykısı açısı oluk adımının ¼'ünden itibaren oluk adımının 1.5 katına kadar artırılmış ve vuruş momentinin değişimi ve tepe değeri kontrol edilmiştir. Simülasyonlardan da görüldüğü gibi vuruş momentini 18.75 derecede bu motor için minimuma ulaştırır. Bu değer motor kutup sayısına bağlı olduğu gibi eksenel akılı motor türüne göre de değişiklik gösterir.



Şekil 7: EASM motorun kaykılı rotor yapısı: Orijinal mıknatıs: ABCD, kaykılı mıknatıs: ABC'D'



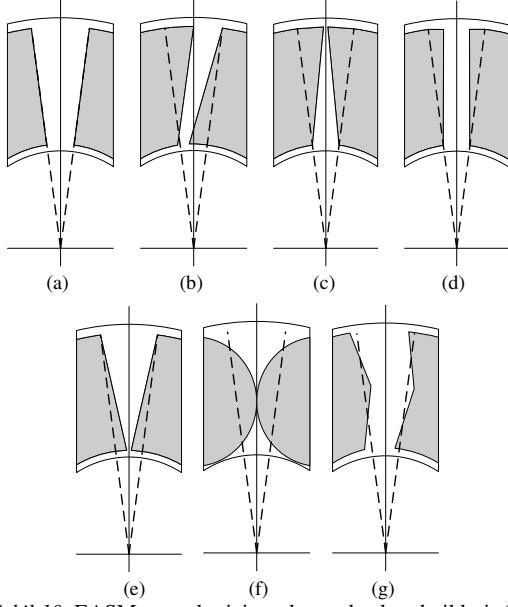
Şekil 8: Vuruş momentinin kaykısı açısı ile değişimi



Şekil 9: Vuruş momentinin tepe değerinin kaykısı açısı ile değişimi

#### 4.4. Diğer Mıknatıs Kaykı Teknikleri

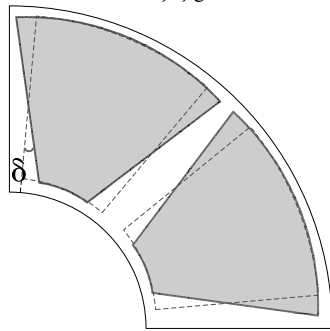
EASM motorlar için birkaç farklı kaykı tekniği Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu teknikler kayksız mıknatıs, klasik kaykılı mıknatıs, üçgen kaykı, paralel kenarlı mıknatıs, yamuk şekilli mıknatıs, dairesel mıknatıs ve çift kaykılı mıknatıstır. Bu kısımda, yukarıda bahsedilen ancak uygulamada henüz yer bulamayan bu kaykılama teknikleri biraz daha yakından incelenecek ve 3D SEA simülasyonları ile etkinlikleri test edilecek ve referans motor ile karşılaştırılacaktır.



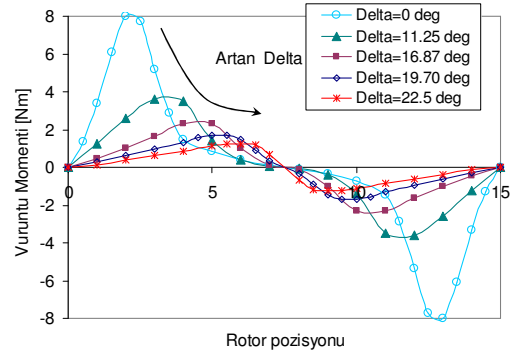
Şekil 10: EASM motorlar için mıknatıs kaykı teknikleri: (a) kayksız mıknatıslar, (b) klasik kaykılı mıknatıslar, (c) üçgen şekilli kaykı (d) paralel kenarlı mıknatıs, (e) yamuk biçimli kaykı, (f) dairesel kaykılı mıknatıs, (g) çift kaykılı mıknatıs

##### 4.4.1. Üçgen Şekilli Kaykı

Şekil 11 de görüldüğü gibi üçgen şekilli kaykı rotorun dış çevresinde mıknatıs kenarlarının birleştirilmesi ve rotorun iç çevresinde mıknatıs kenarlarının birbirinden uzaklaştırılması ile elde edilir. Vuruntu moment dalga şekli bu tip mıknatıslı rotorlarda farklı durumlar için elde edilmiştir. Bu yöntem sayesinde kaykı açısını ( $\delta$ ) ayarlayarak vuruntu momentinde önemli bir düşüş elde edilebilir. Şekil 12'den de görüldüğü gibi  $\delta$  açısı  $0^\circ$ 'dan  $22.5^\circ$  dereceye kadar artırıldığında vuruntu momentinde %84.3'lük bir düşüş görülür.



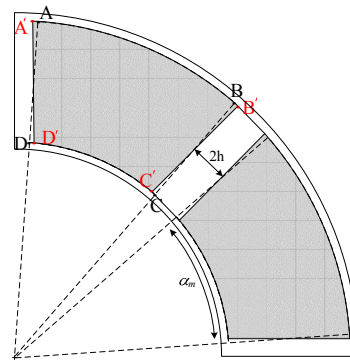
Şekil 11: Üçgen şekilli kaykı



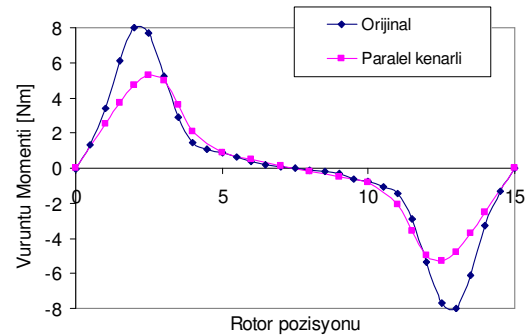
Şekil 12: Artan kaykı  $\delta$  açısı ile vuruntu momentinin değişimi

##### 4.4.2. Paralel Kenarlı Mıknatıslar

Paralel kenarlı mıknatıslı rotor yapısı EASM motorlarda vuruntu momentinin azaltılması için kullanılan başka bir yöntemdir (Şekil 13). Bu metotta, çok kutuplu paralel kenarlı mıknatıslı aksel akılı disk motorlarının vuruntu momentinin azaltılması az kutuplu aksel akılı disk motorlara göre daha fazla etkilidir. Şekil 14'ten de görüldüğü gibi 8 kutuplu bir motor için vuruntu momentinin tepe değerinde referans motora göre %34'lük bir azalma söz konusudur. Kutup sayısının artması vuruntu momentindeki azalmayı da yüzde olarak düşürür.



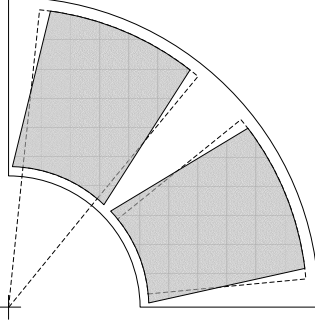
Şekil 13: Paralel kenarlı (A'B'C'D') EASM motor ile radyel kenarlı (ABCD) (standart) EASM motorun rotor yapısı



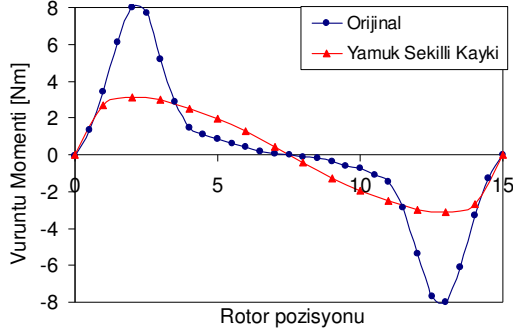
Şekil 14: Paralel kenarlı mıknatıslı EASM motor vuruntu moment değişiminin referans motorun vuruntu momentinin değişimi ile karşılaştırılması

#### 4.4.3. Yamuk Biçimli Kayk

EASM motorlarda vuru momentini azaltmanın başka bir yolu da mıknatıslarda yamuk biçimli kayk kullanmaktır (Şekil 15). Bu metot sonlu elemanlar analizi ile modellendiğinde vuru momentinde referans motora göre yaklaşık %62'lik bir azalma olduğu görülür. Bu yöntemin en büyük dezavantajı, rotor iç çevresinde mıknatıs kenarlarının birbirine yakın olmasından kaynaklanan kaçak akı fazlalığıdır.



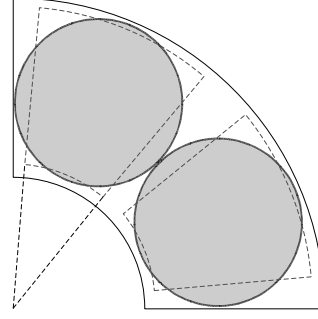
Şekil 15: Yamuk kaykılı EASM motorun rotor yapısı



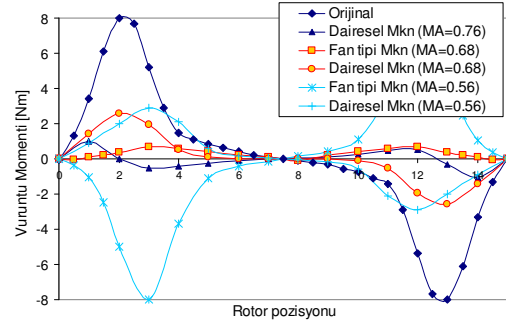
Şekil 16: Yamuk kaykılı EASM motor ile referans motorun vuru momentlerinin karşılaştırılması

#### 4.4.4. Dairesel Mıknatıslar

Dairesel mıknatıslar, EASM motorlarda vuru momentini düşürmenin başka bir etkili yoludur ve pratikte mıknatıs yapısının getirdiği avantajlar nedeni ile sıkça kullanılır. Bu metodun etkinliğini göstermek için farklı dairesel mıknatıslı 3D SEA modelleri oluşturulmuş ve vuru moment simülasyonları üç farklı mıknatıs adımı / kutup adımı için (0.76, 0.68 ve 0.56) çalıştırılmıştır. Bu vuru moment değişimleri yukarıda verilen mıknatıs adımı / kutup adımı değerleri için klasik fan tipi mıknatıslı vuru moment değeri ile karşılaştırılmıştır ve SEA simülasyonları sonuçları Şekil 18'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi vuru momentinde referans motorunun değerlerine göre %93 oranında bir düşüşe neden olduğu anlaşılmıştır.



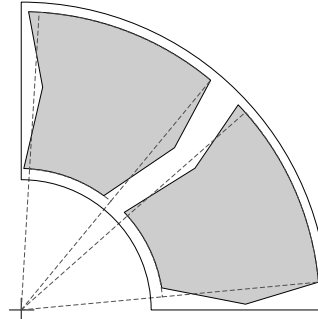
Şekil 17: Dairesel mıknatıslı EASM motorun rotor yapısı



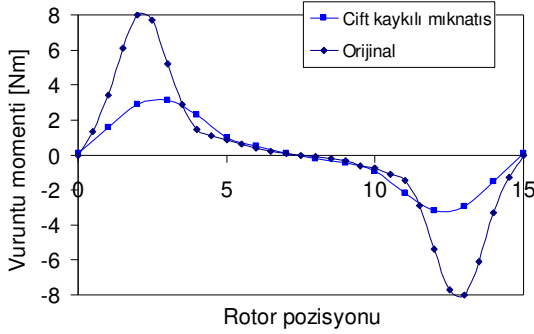
Şekil 18: Dairesel mıknatıslı yapının referans motor ile vuru moment karşılaştırılması

#### 4.4.5. Çift Kaykılı Mıknatıslar

Çift kaykılı mıknatıslar radyal akılı sürekli mıknatıslı motorlara başarı ile uygulanmış ve aksel kuvvetleri ortadan kaldırarak vuru momentinin çok düşük seviyelere indirilebileceği gösterilmiştir [39]. Bu yöntem EASM motorlarına da kolaylıkla uygulanabilir (Şekil 19). Ancak, bu yöntemin muhtemel dezavantajlarından en önemlisi, mıknatısların karmaşık yapısı ve maliyetidir. Çift kaykılı mıknatısların alanı ile referans motorda kullanılan mıknatısların alanı aynı olacak şekilde SEA modelleri oluşturulup vuru simülasyonları çalıştırıldığında Şekil 20'den de görüldüğü gibi oluk adımının yarısı kadar bir kayk vuru momentinde %57.5'lik bir düşüşe neden olur. Vuru momentini en aza indirecek kayk açısını detaylı bir optimizasyon ile elde etmek mümkündür.



Şekil 19: Çift kaykılı mıknatıslı EASM motorun rotor yapısı



Şekil 20: Orijinal vurutu moment değişimi ile çift kaynaklı mıknatıslı yapının vurutu moment değişiminin karşılaştırılması

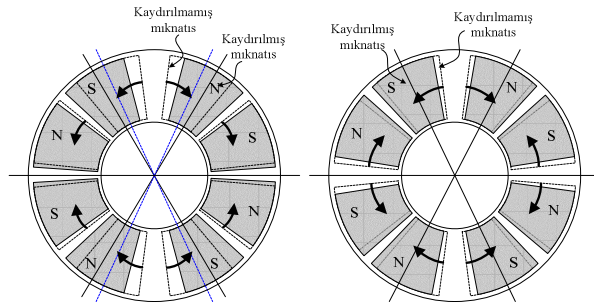
#### 4.5. Mıknatıs veya Kutup Kaydırması

Vurutu moment minimizasyonu için başka bir etkili metot Şekil 21'de gösterildiği gibi bitişik mıknatısları birbirine göre kaydırma yöntemidir. Ancak mıknatıslar simetrik konumlarından kaydırıldığında mıknatısın bir tarafındaki kaçak akı artarken diğer tarafındaki kaçak akı azalacaktır. Bu yöntemin başka bir dezavantajı ise zıt EMK dalga şeklinin bozulması ve moment dalgalanmasına neden olmasıdır.

Şekil 22'de iki farklı mıknatıs kaydırma yöntemi kullanılarak vurutu moment değişimi gösterilmiştir. İlk mıknatıs grubu bir oluk adımının  $\frac{1}{4}$ 'ü kadar (3.75 derece) kaydırılırken, yanındaki ikinci mıknatıs grubu 7.5 derece kaydırılmıştır. Şekil 22'de gösterildiği gibi vurutu momentini referans motora göre ilk mıknatıs grubu için %56.2, ikinci mıknatıs grubu için % 76.2 azalmıştır.

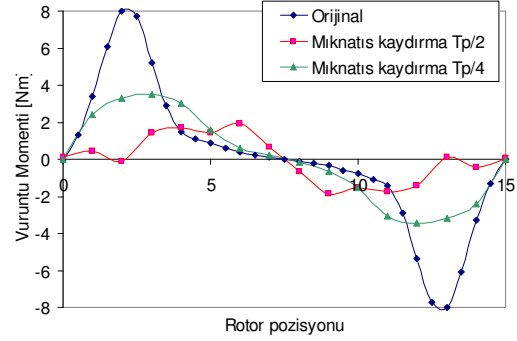
#### 4.6. Değişken Mıknatıs Adımı

Şekil 5'de gösterildiği gibi vurutu momentin fazı ve tepe değeri mıknatıs adımı ile değişkenlik gösterir. Bu nedenle bitişik mıknatıslarda farklı mıknatıs adımları kullanılarak EASM motorlarda vurutu moment daha fazla düşürülebilir (Şekil 23) [26][28]. Bu amaç için çok sayıda farklı 3D SE modelleri oluşturmak ve her bir durum için vurutu momentinin analiz edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, çok sayıda farklı SEA modelleri oluşturularak bitişik mıknatıslardaki mıknatıs adımları değiştirilmiş ve vurutu momentini en aza indirecek mıknatıs adımlarının ne

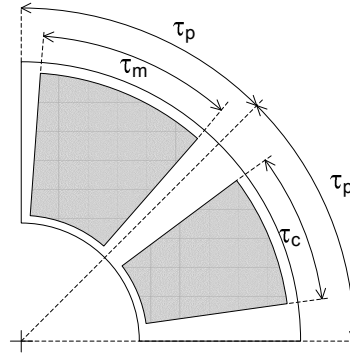


Şekil 21: EASM motorların mıknatıs yerleştirme (kutup kaydırma) seçenekleri

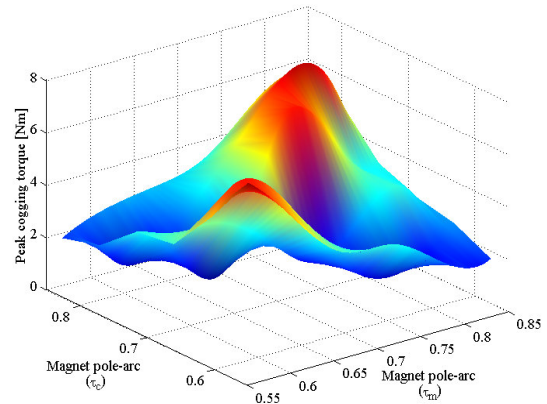
olabileceği Şekil 25'te de gösterildiği gibi bulunmuştur. Buna göre bitişik mıknatıslardaki mıknatıs adımları 110 ve 140 derece olarak seçilirse, vurutu momentin tepe değerinin referans motora göre yaklaşık olarak %86 azalmış olduğu görülmüştür. Şekil 24 ve Şekil 25'te 2D/3D simülasyon sonuçlarından bu optimum nokta kolaylıkla belirlenebilir.



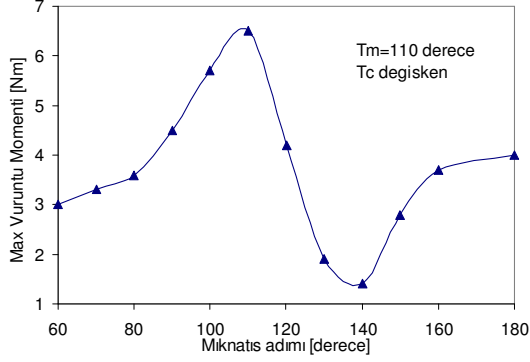
Şekil 22: Mıknatıs (ya da kutup) kaydırmanın vurutu momentine etkisi ve referans motor ile karşılaştırılması



Şekil 23: İki farklı mıknatıs adımı ile oluşturulmuş bir EASM motor rotoru



Şekil 24: Vurutu moment tepe değerinin her iki mıknatıs adımına göre değişimi

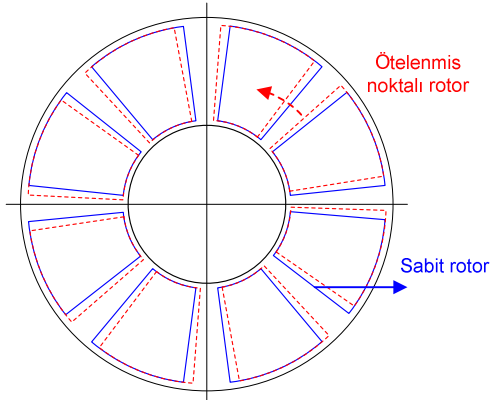


Şekil 25: Vuruntu moment tepe değerinin mknatsis adımına göre değişimi (Diğer mknatsis adımı 110 derecede sabitlenmiştir)

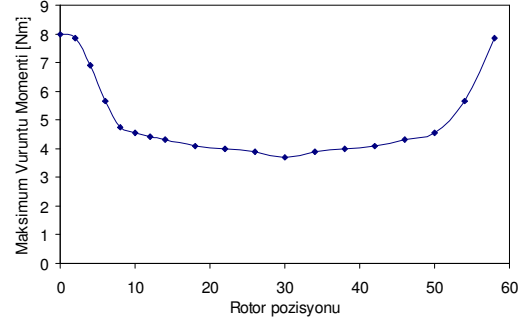
#### 4.7. Rotorun Dairesel Olarak Ötellenmesi

Çift hava aralıklı EASM motolarda vuruntu momenti her bir hava aralığındaki vuruntu momentlerin toplamına eşittir. Bu sebepten rotorların biri diğerine göre ötelenirse (Şekil 26) her bir hava aralığındaki vuruntu momentlerinin toplamı toplam vuruntu momentini vereceğinden, toplam vuruntunun tepe değeri aşağıya çekilebilirler.

Bu nedenle 3D sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuş, farklı rotor ötellenmeleri için ( $1.5^\circ$ – $15.0^\circ$ ) vuruntu momentinin değişimi bulunmuş ve Şekil 27 de bu değişimin maksimum değerleri gösterilmiştir. SE simülasyonlarından da görüldüğü gibi, minimum vuruntu momenti  $\frac{1}{2}$  oluk adımı için elde edilmiştir. Başka bir deyişle, bir rotor diğer rotora göre  $\frac{1}{2}$  oluk adımı kadar (mekanik olarak  $7.5^\circ$ ) döndürülürse minimum vuruntu momenti elde edilmiş olur. Bu değer referans motorun vuruntusundan yaklaşık %54.7 daha düşüktür. Bu simülasyon sonuçları referans motorun mknatsis adımı kullanılarak elde edilmiştir. Şayet, farklı mknatsis adımları ve kayk yöntemleri kullanılarak bu analizler yinelenirse, minimum vuruntu moment noktası daha da aşağılara çekilebilir.



Şekil 26: Birbirine göre ötellenmiş iki farklı EASM motor rotoru (2-rotor-1-stator lu EASM motor örnek olarak alınmıştır)



Şekil 27: Birbirine göre ötellenmiş rotorların vuruntu momentinin ötellenme açısına göre değişimi

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada EASM motorlarda vuruntu momenti azaltma yöntemleri tartışılmıştır. Çift-rotor-tek-statorlu EASM bir motor referans motor olarak kullanılmış ve çeşitli teknikler 3D sonlu elemanlar yöntemi ile modellenip analiz edilerek bu tekniklerin etkisi ve etkinliği test edilmiştir.

RASM motorlara benzer şekilde EASM motorlarda da mknatsis adımının kutup adımına oranı vuruntu momentini azaltmanın en etkin yollarının başında geldiği bu çalışmada gösterilmiştir. Stator oluk sayısı ve kutup sayısı kombinasyonu EASM motorlarda da vuruntu momentini etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Ayrıca, bu çalışmadan da görüldüğü gibi kayk, vuruntu momentinin değerinin düşürülmesinde çok etkin bir yöntem olmakla birlikte, farklı kayk metotları EASM motorlara değişik şekillerde uygulanabilir. Her bir mknatsis kayk yönteminin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur ve bu çalışmada bu konulara da değinilmiştir. Çift-rotor-tek-statorlu veya çift-stator-tek-rotorlu EASM motorlarda çift rotor ya da çift statordan birinin diğerine göre belli oranda döndürülmesinin de vuruntu momentinin tepe değerini azaltmanın etkin yollarından birisi olduğu bu çalışmada gösterilmiştir.

## 6. Teşekkür

Yazar yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Mehmet Timur Aydemir, Prof. Dr. Kemal Sarıoğlu ve Evrim Eveyik-Aydın'a teşekkür eder.

## 7. Kaynakça

- [1] J. D. L. Ree, ve N. Boules, "Torque production in permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol.25, no.1, s.107-112, 1989.
- [2] T. M. Jahns, ve W. L. Soong, "Pulsating torque minimisation techniques for permanent magnet ac motor drives: a review," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol.43, no.2, s.321-330, 1996.
- [3] C. Studer, A. Keyhani, T. Sebastian, ve S. K. Murthy, "Study in cogging torque in permanent magnet machines," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1997, New Orleans, s.42-49.
- [4] D. C. Hanselman, "Effect of skew, pole count and slot count on brushless motor radial force, cogging torque and back emf," *IEE Proc. Electric Power Applications*, vol.144, no.5, s.325-330, 1997.

- [5] M. S. Islam, S. Mir, ve T. Sebastian, "Issues in reducing the cogging torque of mass-produced permanent-magnet brushless DC motor," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol.40, no.3, s.813-820, 2004.
- [6] J. A. Wagner, "Numerical analysis of cogging torque in a brushless DC machine", *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1975, s.669-673.
- [7] T.Li, ve G. Slemon, "Reduction of cogging torque in PM motors," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.24, no.6, s.2901-2903, 1988.
- [8] Z.Q. Zhu, ve D. Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol.15, no.4, s.407-412, 2000.
- [9] N. Bianchi, ve S. Bolognani "Design techniques for reducing the cogging torque in surface-mounted PM motors," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol.38, no.2, s.1259-1265, 2002.
- [10] K. H. Kim, D. J. Sim, ve J. S. Won, "Analysis of skew effects on cogging torque and BEMF for BLDCM," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1991, s.191-197.
- [11] R. P. Deodhar, D. A. Staton, T. M. Jahns, ve T. J. E. Miller, "Prediction of cogging torque using the flux-MMF diagram technique," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol.32, no.3, s.569-576, 1996.
- [12] J. M. Kauffmann, A. Miraoui, ve Li Kong, "Irregular shifting of permanent magnet to reduce the cogging torque of a brushless motor," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1991, s.191-197.
- [13] Z. Q. Zhu, ve D. Howe, "Analytical prediction of the cogging torque in radial-field permanent magnet brushless motors," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.28, no.2, s.1080-1083, Mar. 1992.
- [14] S.K. Chang, S.Y. Hee, W.N. Ki, ve S.C. Hong, "Magnetic pole shape optimization of permanent magnet motor for reduction of cogging torque," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 33, no.2, s.1822-1827, 1997.
- [15] M. Goto, ve K. Kobayashi, "An analysis of the cogging torque of a DC motor and a new technique of reducing the cogging torque," *Electrical Engineering in Japan*, vol.103, no.5, s.113-120, 1983.
- [16] K. Kobayashi, ve M. Goto, "A brushless DC motor of a new structure with reduced torque fluctuations," *Electrical Engineering in Japan*, vol.105, no.3, s.104-112, 1985.
- [17] B. Ackermann, J.H.H Janssen, R. Sottek, ve R.I. Van Steen, "New technique for reducing cogging torque in class of brushless motors," *IEE Proc. Electric Power Applications*, vol.139, no.4, s.315-320, 1992.
- [18] J.R. Hendershot, ve T.J.E. Miller, "*Design of brushless permanent magnet motors*," Magna Physics Publishing & Clarendon Press, 1994.
- [19] C. C. Hwang, S. B. John, ve S. S. Wu, "Reduction of cogging torque in spindle motors for CD-ROM drive," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.34, no.2, s.468-470, 1998.
- [20] Y. D. Yao, D. R. Huang, J. C. Wang, S. H. Liou, S. J. Wang, T. F. Ying ve D. Y. Chiang, "Simulation study of the reduction of cogging torque in permanent magnet machines," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.33, no.5, s.4095-4097, 1997.
- [21] J. Hur, ve D. Hyun, "A method for reduction of cogging torque in brushless DC machine considering the distribution of magnetization by 3DEMCN," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.34, no.5, 1998.
- [22] Z.Q. Zhu, S. Ruangsinchaiwanich, D. Ishak, ve D. Howe, "Analysis of cogging torque in brushless machines having non-uniformly distributed stator slots and stepped rotor magnets," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.41, no.10, s.3910-3912, 2005.
- [23] G. Bakarat, T. El-Meslouhi, ve B.Dakyo, "Analysis of the cogging torque behavior of a two-phase axial-flux permanent magnet synchronous machine," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.37, no.4, s.2803-2805, 2001.
- [24] F. Caricchi, F. Giulii Capponi, F. Crescimbeni, ve L. Solero, "Experimental study on reducing cogging torque and core power loss in axial-flux permanent-magnet machines with slotted winding," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2002, s.1295-1302.
- [25] E. Muljadi, ve J. Green, "Cogging torque reduction in a permanent magnet wind turbine generator," *21<sup>th</sup> American Society of Mechanical Engineers Wind Energy Symposium*, Reno NV, 2002.
- [26] M. Aydin, R. Qu, ve T. A. Lipo, "Cogging torque minimization technique for multiple-rotor, axial-flux, surface-mounted-PM machines: alternating magnet pole-arcs in facing rotors," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2003, s.555-561.
- [27] A. Letelier, J. A. Tapia, R. Wallace, ve A. Valenzuela, "Cogging torque reduction in an axial-flux PM machine with extended speed range," *IEEE International Electrical Machines and Drive Conference*, 2005, s.1261-1267.
- [28] M. Aydin, "Axial-flux surface mounted permanent magnet disc machines for smooth torque traction drive applications," *Doktora Tezi*, University of Wisconsin-Madison, 2004.
- [29] R. Qu, ve T. A. Lipo, "Dual-rotor, radial-flux, toroidally wound, permanent-magnet machines," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol.39, no.6, s.1665-1673, 2003.
- [30] S.J. Salon, "Finite element analysis of electrical machines," Norwell, MA: Kluwer, 1995.
- [31] J. L. Coulomb, "A methodology for the determination of global electromechanical quantities from a finite element analysis and its application to the evaluation of magnetic forces, torques and stiffness," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.19, no.6, s.2514-2519, 1983.
- [32] D. Howe, ve Z. Q. Zhu, "The influence of finite element discretisation on the prediction of cogging torque in permanent magnet excited machines," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.28, no.2, s.1080-1083, 1992.
- [33] C. M. Chao, S. J. Wang, C. P. Liao, D. R. Huang, ve T. F. Ying, "Torque and cogging torque in sandwich type CD-ROM spindle machine," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.34, no.2, s.471-473, 1998.
- [34] Y. Kawase, T. Yamaguchi, ve Y. Hayashi, "Analysis of cogging torque of permanent magnet machine by 3-D finite element method," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.31, no.3, s.2044-2047, 1995.
- [35] Z. Q. Zhu, P. J. Hor, D. Howe, ve J. Rees-Jones, "Calculation of cogging force in a novel slotted linear tubular brushless permanent magnet machine," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.33, no.5, s.4098-4100, 1997.
- [36] P.J. Hor, Z.Q. Zhu, ve D. Howe, "Minimization of cogging force in a novel slotted linear brushless permanent magnet machine," *Trans. IEEE Magnetics*, vol.34, no.5, s.3544-3547, 1998.
- [37] Z.Q. Zhu, Z.P. Xia, D. Howe, ve P.H. Mellor, "Reduction of cogging force in linear permanent magnet machines," *Proc. IEE-Electric Power Applications*, vol.144, no.4, s.277-282, 1997.
- [38] Z. Q. Zhu, S. Ruangsinchaiwanich, Y. Chen, ve D. Howe, "Evaluation of superimposition technique for calculating cogging torque in permanent magnet brushless machines," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.42, no.3, s.1597-1603, 2006.
- [39] Frank Jurisch, "Shell-shaped magnet", *United States Patent*, Patent Number: US24028945A1, 2004.